doi:10.13866/j.azr.2018.04.05

科尔沁沙地不同林龄樟子松人工林土壤生态化学计量特征①

淑 敏1，姜 涛[2]，王东丽[1]，连 昭[1]，汤家喜[1]，
孔 涛[1]，徐艺元[1]，韩小美[1]
（1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院，辽宁 阜新 123000；2. 辽宁省风沙地改良利用研究所，辽宁 阜新 123000）

摘 要：以科尔沁沙地不同林龄（15 a、25 a、35 a 和 45 a）樟子松林为对象，研究其 0～100 cm 土层土壤有机碳、全氮和全磷含量及其生态化学计量特征，探讨土壤碳氮磷化学计量特征的垂直分布规律及随林龄的变化规律。结果表明：① 4 种林龄樟子松林土壤（0～20 cm 土层）有机碳、全氮和全磷含量分别为 7.34、0.39 g·kg^{-1} 和 0.19 g·kg^{-1}，均低于全国平均水平。② 随着林龄的增加，有机碳含量、C/N 和 C/P 均呈现增大的趋势；全氮和全磷含量呈现先增加后降低（45 a 生林分显著降低）；而 N/P 的变化不显著。③ 随着土层的加深，有机碳和全氮含量的变化趋势基本一致，均呈现逐渐降低的趋势，但是各林分在 0～20 cm 土层中的有机碳和全氮含量均不足总含量的 1/3；C/N 和 C/P 呈现相反的变化趋势（C/N 增加、C/P 降低）；而全磷含量和 N/P 的垂直分布较为均匀，变化不大。综上所述，本研究区樟子松林土壤中的有机碳、全氮、全磷含量极为贫瘠，但樟子松人工林种植增加了土壤碳、氮、磷养分含量；各林龄樟子松林土壤同时受氮、磷养分的限制，但随土层加深受氮的限制更为显著。

关键词：樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）林龄；土壤；生态化学计量；科尔沁沙地

生态化学计量学是研究多种元素化学平衡的一门科学，重点强调生物有机体主要组成元素碳、氮和磷化学计量特征之间的关系[1]。森林土壤作为陆地生态系统的重要组成部分，主要养分碳、氮、磷是植物生长发育的重要营养元素。研究不同森林类型土壤的生态化学计量学特征，对揭示土壤养分限制情况和碳、氮、磷循环与平衡机制以及森林生态系统可持续经营管理具有重要意义[2]。刘万德等研究发现[3]，我国西南季风常绿阔叶林的不同演替阶段（15 a、30 a 及原始林）土壤 C/N 无显著的变化，而 N/P 和 C/P 则随演替进程表现出下降的趋势。在高寒草甸生态系统的研究中，土壤 C/N、N/P 和 C/P 随着草甸的退化呈降低趋势[4]。曹娟等研究发现[5]，不同林龄（7 a，17 a 和 25 a 生）杉木人工林土壤碳、氮和磷含量随林龄的增加而逐渐得到恢复，土壤的 N/P 和 C/P 均随着林龄的增加呈下降后升高的趋势。这些研究表明，土壤的碳、氮、磷及其化学计量随林龄增加表现出明显的动态特征，且 C/N 和 N/P 具有随群落正向演替或恢复而呈现增加的趋势，从而能很好地指示植被的演替或恢复状况[6-7]。目前，对于不同林龄森林土壤生态化学计量特征的研究报道较少，并且生态系统不同组分或不同元素化学计量比基于林 龄的变化是否具有一致的模式还不能定论[8]。因此，在不同空间尺度上开展化学计量比随林龄变化的研究显得十分必要。

樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）由于其耐寒、抗旱、较速生等优良特性，已成为东北地区用材、防风固沙和水土保持的优良树种之一[9]。自 20 世纪 50 年代在科尔沁沙地东南缘章古台地区人工引种用于固沙造林试验成功以来，近几十年当地科研机构先后进行了大规模的樟子松种植，使得章古台地区呈现不同林龄樟子松共存格局。同时也出现了一定面积的衰退甚至死亡的现象[10-12]，因此，必须加强樟子松人工林可持续经营等技术措施方面的研究。在半干旱风沙地的植物不仅受水分匮缺的影响，还受到土壤养分贫瘠和风沙环境的限制，尤其是

① 收稿日期：2017－－； 修订日期：2017－－
基金项目：辽宁工程技术大学生产技术问题创新研究基金（20160013T）；国家自然科学基金项目（41701325，41501548）；辽宁省教育厅科学技术研究项目（LJYL023）；辽宁省大学生创新项目（201610147000021）
作者简介：淑敏（1984－），女，讲师，博士，主要从事水土保持与防护林生态研究. E-mail：bcym1984@163.com
通讯作者：汤家喜. E-mail：tangjiaxi@lntu.edu.cn

土壤养分限制将会对植物的生长发育有显著影响。而林分土壤碳、氮、磷生态化学计量特征随林龄变化的研究,对准确评价林地养分状况、制定合理经营措施十分重要[5]。因此,本研究通过分析不同林龄樟子松林土壤有机碳、全氮、全磷含量及其生态化学计量特征,探讨土壤碳氮磷化学计量特征的垂直分布规律和随林龄的变化规律,以期为樟子松人工林可持续经营提供养分管理策略。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样地设置

研究地点设在科尔沁沙地东南缘,辽宁省风沙地利用改良研究所章古台试验基地(122°32′E,42°42′N)。试验样地海拔 345.1 m,年平均气温 6.8 ℃,1 月平均气温 -16.2 ℃,7 月平均气温 23.8 ℃。年平均降水量 450 mm 左右,主要集中在 6—8 月。土壤类型主要为风沙土和草甸土,植被属内蒙古植物区系,以抗旱性较强的沙生植物为主。研究样地选取土壤类型及立地条件基本一致的不同林龄(15 a、25 a、35 a、45 a)的樟子松人工林林地,在每个样地内分别设置 3 块 20 m×20 m 的样地,对样地内植株进行每木检尺,得到林分的基本情况,具体见表 1。

表 1 样地基本情况

Tab.1 Basic information of sample plots

样地编号	林分年龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	密度/(株·hm^{-2})
1	15	2.1	4.3	785
2	25	5.4	7.8	642
3	35	8.9	12.6	614
4	45	9.7	17.5	419

1.2 土样样品采集与测定

2015 年 8 月在每个选定好的样地内按"品"字形随机设 3 个土壤取样点,每个取样点分别按 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层采集土壤样品[13],将对应土层的 3 个土样混合均匀,带回实验室备用。土样经实验室自然风干,挑去植物残体和石块等杂物,分别过 10 目(1.7 mm 孔径)、100 目土壤筛(0.15 mm 孔径),过筛后装瓶备用,用于测定土壤有机碳、全氮和全磷含量。有机碳采用重铬酸钾氧化外加热法测定,全氮用凯式定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定[14]。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel2017 进行数据处理和做图表;使用 SPSS19.0 进行单因素方差(one - way ANOVA)分析,采用 LSD 法比较各指标在不同林地与不同土层间的差异性,显著性水平设为 $\alpha=0.05$。

2 结果与分析

2.1 不同林龄樟子松林土壤有机碳、全氮、全磷含量垂直分布特征

林龄、土层及其交互作用均显著影响着有机碳含量(表 2)。从图 1 可以看出,15 a、25 a、35 a 和 45 a 生樟子松林土壤有机碳含量在 2.51~8.27 g·kg^{-1},随着林龄的增加而增大,35 a 和 45 a 生樟子松林土壤有机碳含量显著高于其他林分($P<0.05$)。不同林龄同一土层,0~20、40~60 cm 和 80~100 cm 土层有机碳含量在 35 a 和 45 a 显著高于 15 a 和 25 a 生林分($P<0.05$);20~40 cm 和 60~80 cm 土层在各林龄之间均有显著差异($P<0.05$)。同一林龄不同土层,15 a 生樟子松林在 0~60 cm 土层有机碳含量较多,60 cm 土层以下其含量显著下降($P<0.05$);25 a 和 35 a 生樟子松林有机碳含量在 0~100 cm 土层表现出逐渐下降的趋势,具有较好的垂直分布规律;45a 生樟子松林在 0~20 cm 土层有机碳含量显著高于其他土层,而 20~100 cm 土层有机碳分布较均匀,可见,地表凋落物对其有机碳积累贡献较大。

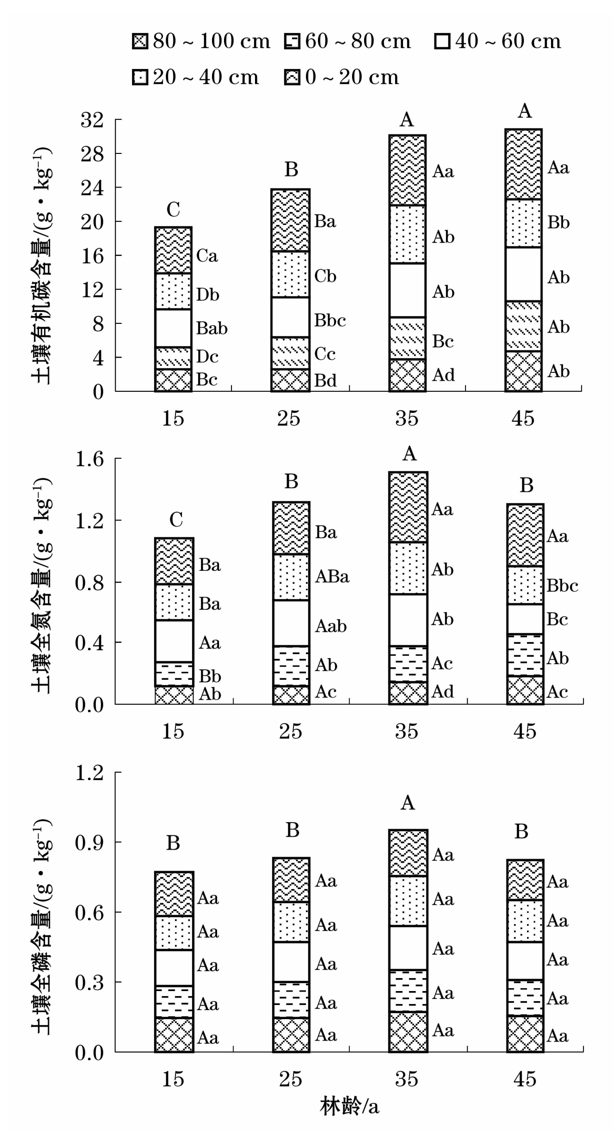
林龄及土层显著影响着全氮含量,但交互作用的影响不显著(表 2)。4 种林龄樟子松林土壤全氮含量在 0.12~0.45 g·kg^{-1},随着林龄的增加而逐渐增加后降低,35 a 生樟子松林土壤全氮含量显著高于其他林分($P<0.05$)。不同林龄同一土层,0~20 cm 土层全氮含量在 35 a 和 45 a 显著高于 15 a 和 25 a 生林分($P<0.05$);20~60 cm 土层全氮含量在 35 a 生显著高于其他林分($P<0.05$);而 60~100 cm 土层全氮含量在各林龄之间差异不大。同一林龄不同土层,15 a、25 a、35 a 和 45 a 生樟子松林全氮含量垂直分布规律与有机碳含量一致(图 1),可见,地表凋落物对全氮积累也有较明显的作用。

林龄、土层及其交互作用对全磷含量影响都不显著(表 2)。各林龄樟子松林土壤全磷含量在 0.14~0.21 g·kg^{-1},随着林龄的变化与全氮一样,先增加后降低。其中,35 a 生樟子松林土壤全磷含量

显著高于其他林分($P<0.05$)。同一土层不同林龄间全磷含量差异不大。同一林龄不同土层间全磷含量差异也不显著(图1)。

2.2　不同林龄樟子松林土壤碳氮磷化学计量特征的垂直分布

林龄、土层及其交互作用对土壤C/N的影响均不显著(表2)。从图2可以看出,4种林龄樟子松林土壤的C/N在14.1~40.6,随着林龄的增加而增大,45 a生樟子松林C/N显著高于其他林分($P<0.05$)。不同林龄同一土层,0~40 cm土层C/N在各林龄之间差异不大,而土层40 cm以下C/N在35 a和45 a显著高于15 a和25 a生樟子松林($P<0.05$)。同一林龄不同土层,15 a和25 a生樟子松林C/N在0~80 cm土层中分布较均匀,显著低于80~100 cm土层($P<0.05$)。35 a生樟子松林C/N在0~100 cm土层表现出随着土层加深而逐渐增大,具有较好的垂直分布规律。45 a生樟子松林C/N在0~40 cm土层显著低于40~100 cm土层($P<0.05$)。



注:小写字母表示同林龄的0~100 cm土层间的差异显著($P<0.05$),大写字母表示同土层不同林龄间的差异显著($P<0.05$)。下同。

图1　不同土层土壤有机碳、全氮和全磷含量随林龄变化

Fig. 1　Ratios of SOC、T N and T P in two soil layers in the forests at different ages

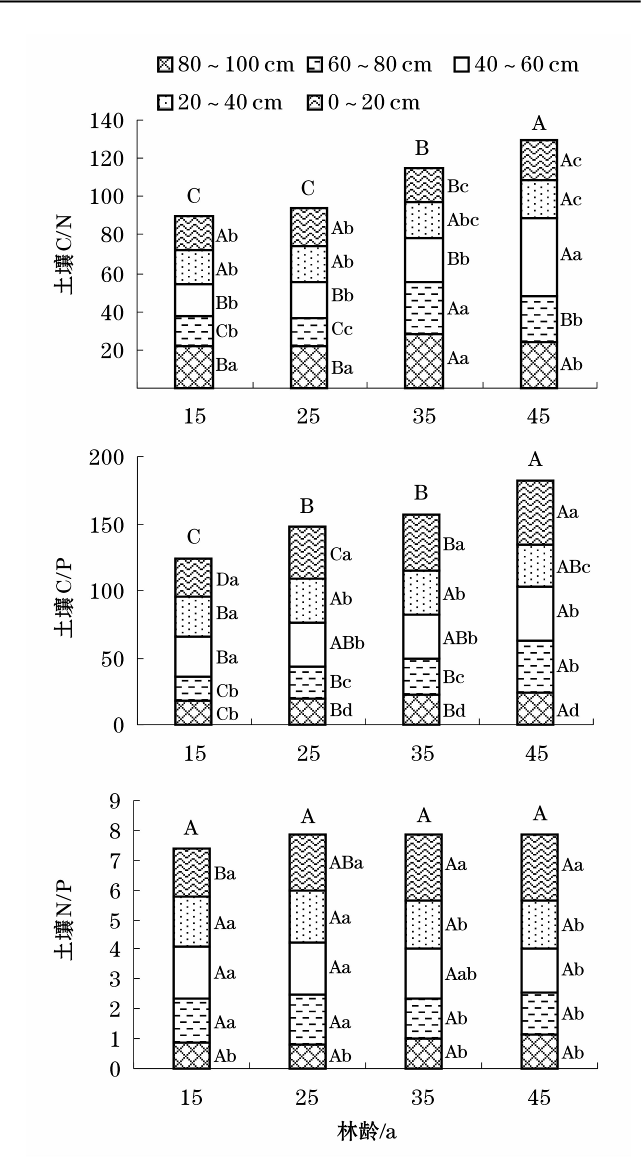


图2　不同土层土壤C/N、C/P和N/P随林龄变化情况

Fig. 2　Ratios of C/N、C/P、N/P in two soil layers in the forests at different age

土层及其交互作用对C/P影响显著,但林龄对C/P影响并不显著(表2)。4种林龄樟子松林C/P在17.7~46.5,随着林龄的变化趋势与C/N一致,而45 a生樟子松林C/P显著高于其他林分($P<0.05$)。不同林龄同一土层:0~20 cm土层C/P在各林分之间有显著差异($P<0.05$);20~100 cm土层

C/P 在 15 a 生樟子松林显著低于其他林分($P<0.05$)。同一林龄不同土层:15 a、25 a 和 35 a 生樟子松林 C/P 在 0~100 cm 土层表现出逐渐下降,具有较好的垂直分布规律;45 a 生樟子松林 C/P 在 0~20 cm 土层显著高于其他土层($P<0.05$),20 cm 以下土层也有显著差异($P<0.05$)(图 2)。

土层、林龄及其交互作用对 N/P 影响均不显著(表2)。各林龄樟子松林 N/P 在0.8~2.3 之间,随着林龄的变化不显著。不同林龄同一土层:0~20 cm 土层 N/P 在 15 a 生显著低于其他林分($P<0.05$);20~100 cm 土层 N/P 在各林龄之间差异均不显著。同一林龄不同土层:15 a 生和 25 a 生樟子松林 N/P 在 0~80 cm 土层分布较均匀,而显著高于 80~100 cm 土层($P<0.05$);35 a 生和 45 a 生樟子松林 N/P 在 0~20 cm 土层显著高于其他土层($P<0.05$),20 cm 以下土层分布较均匀(图 2)。

表 2 林龄和土层对土壤碳、氮、磷和生态化学计量比的方差分析

Tab. 2 Ages and soil depth on C、N、P and the ecological

	SOC	TN	TP	C/N	C/P	N/P
林龄	0.032*	0.043*	0.038*	0.103	0.137	0.972
土层	0.016*	0.005**	0.125	0.468	0.006**	0.205
林龄×土层	0.019*	0.037*	0.077	0.186	0.008**	0.483

注:**表示 $P<0.01$,*表示 $P<0.05$。

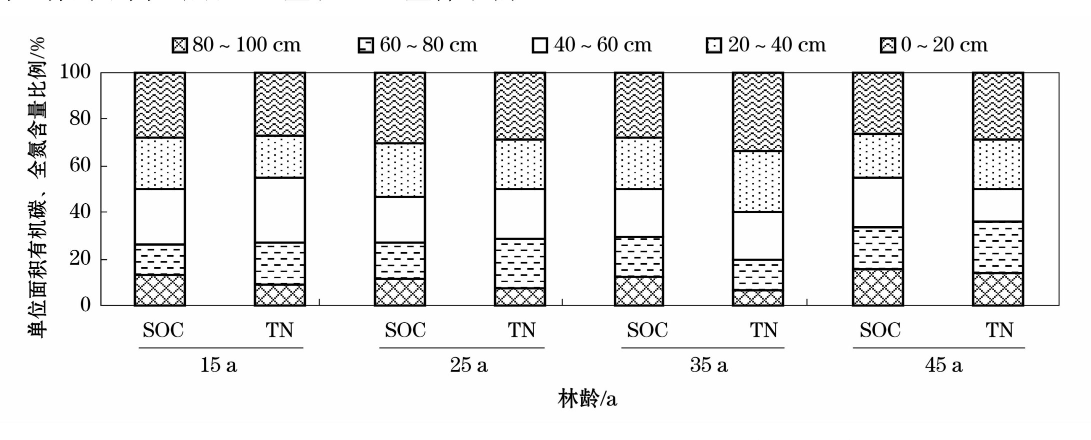


图 3 不同林龄樟子松林土壤有机碳和全氮含量垂直分布比例

Fig. 3 SOC and TN vertical distribution ratio of different aged P. sylvestris var. mongolica planted forests

2.3 不同林龄樟子松林土壤有机碳、全氮含量垂直分布比例

不同土壤层次单位面积有机碳和全氮含量占总土壤有机碳和全氮含量的百分比不同(图 3),15 a、25 a、35 a 和 45 a 生樟子松林在 0~20 cm 土层有机碳含量百分比分别为 27.6%、30.1%、26.6% 和 26.9%,全氮含量分别为 26.5%、28.7%、32.1% 和 28.6%,各林分有机碳和全氮含量都不足总含量的 1/3。在 0~40 cm 土层,各林龄樟子松林有机碳含量百分比分别为 48.7%、52.9%、50.3% 和 45.0%,全氮含量分别为 45.1%、46.3%、60.0% 和 50.1%,仍然有林分不足总含量的 50%。

3 讨 论

3.1 樟子松林土壤碳氮磷化学计量特征

研究区樟子松林土壤(0~20 cm 土层)的有机碳、全氮、全磷的平均含量较低(7.34,0.39,0.19 $g\cdot kg^{-1}$),远低于全国(11.12,1.06,0.65 $g\cdot kg^{-1}$)水平[15]和黄土高原刺槐林(8.13,0.74,1.12 $g\cdot kg^{-1}$)[16],可知该研究区土壤碳、氮、磷养分含量极为贫瘠。土壤 C/N 和 C/P 通常是评价有机质矿化快慢和土壤磷有效性的重要指标,C/N 和 C/P 越高,说明土壤有机层的有效氮和磷含量越低[17]。4 种林龄樟子松林土壤 C/N,C/P(18.95,38.33)均高于全国水平(12.01,25.77)[15],说明各林龄林地土壤有效氮和磷含量都较少,科尔沁沙地樟子松林土壤养分限制表现为氮、磷共同限制。

3.2 林龄对樟子松林土壤碳氮磷生态化学计量的影响

本研究发现,4 种林龄樟子松林土壤有机碳含量具有随着林龄的增加而逐渐增大的趋势,由造林初期(15 a 生樟子松林)的 19.3 $g\cdot kg^{-1}$增加到 30.9 $g\cdot kg^{-1}$(45 a 生樟子松林),表明,该地区樟子松林在其生长过程中表现为显著碳汇。王凯等,Luyssaert 等和史军辉等的研究也都表明土壤有机碳积累与植被群落年龄存在正相关关系[18-20]。土壤有机质是各种营养元素特别是 N 元素的主要来源,故

土壤理化性质的变化、凋落叶养分归还等因素均会影响土壤的碳、氮、磷含量。本研究发现,35 a 生樟子松林林下草本的枯落物相对比例较高,能够在土壤微生物等的作用下较快分解并将养分释放到土壤中,故土壤 C、N、P 均较高。而 45 a 生樟子松林的枯损量较高,相比出现了林分衰退,故土壤 N 和 P 含量出现降低的趋势,这与以往对樟子松的研究结果基本一致[21-23]。表明 45 a 生樟子松林分开始衰退,全氮和全磷含量出现显著降低,限制了当地樟子松林的可持续发展。这可能是由于人工林为纯林,林分结构简单,林下植被稀少,凋落物现存量不足且分解转化程度缓慢,45 a 生林木消耗量的增加,土壤养分消耗与归还之间的平衡被打破,土壤肥力逐渐降低。因此,可以通过调整林分结构、促进养分归还以及适度施肥等措施,来缓解当地樟子松林地力衰退的趋势,促进樟子松林的可持续发展。

土壤 C/N 和 C/P 是主要评价土壤氮、磷有效性的重要指标[24],各林龄樟子松林土壤 C/N 和 C/P 均随着林龄的增加而逐渐增大。说明随着林龄增加,樟子松林土壤氮和磷的有效性正在逐渐降低[25],樟子松的生长过程可能会同时受到氮、磷养分的限制,正好符合了上述结果。土壤 N/P 是养分限制类型的预测指标[26],4 种林龄樟子松林土壤 N/P 随着林龄增加而差异不大,这结果进一步说明各林龄樟子松林土壤之间存在同样的氮和磷养分限制。

3.3　土层对樟子松林土壤碳氮磷生态化学计量的影响

土壤有机碳、全氮和全磷含量的垂直分布格局主要是由 碳、氮、磷的来源决定的。森林土壤的碳、氮主要来源于凋落物、植物根系及其分泌物所形成的有机质,因此土壤碳、氮首先是在表层中积累,随土层深度增加而有机质的量逐渐减少,因而表土层土壤中的碳、氮含量高于深层,就呈现“倒金字塔”分布模式。本研究中的各林龄樟子松林土壤有机碳含量随着土层深度增加而逐渐降低,尤其是 25 a 和 35 a 生林分具有较好的垂直分布规律。但是各林分在 0 ~ 20 cm 土层中的有机碳含量均不足总含量的 1/3,这和以往在黄土高原[27]西南地区[28]的土壤有机碳含量主要集中在 0 ~ 20 cm 土层中的研究结果不一致。即使在 0 ~ 40 cm 土层,2 个林分仍然不足总含量的 1/2。土壤全氮含量的垂直分布规律与有机碳含量基本一致。这结果说明沙地林分土壤碳、氮含量分布深度大于其他土壤类型。这可能一方面由于研究区沙地人工林往往无法自然更新[9],地表植被稀少;另一方面该区风沙大,大量凋落物被吹走,而且降雨少,凋落物无法充分腐烂分解。所以,土壤从地上部分得到碳、氮的补充较少,而地下根系很可能是该区土壤有机碳和氮的主要来源。由于沙地土壤孔隙较大、渗透好,根系分布较深,造成土壤有机碳和氮的分布也较深,从而形成了沙地特殊的分布格局。而土壤全磷含量在各林分中随着土层深度的加深没有明显差异,呈现“圆柱体”的分布模式。其原因可能是土壤磷主要来源于岩石风化,而岩石风化是一个漫长的过程,风化程度在 0 ~ 100 cm 土层中无明显的差异,因而,土壤全磷含量在土壤剖面上的变化不明显[29]。

4 种林龄樟子松林各土层 C/N 在 15 a 和 25 a 生林分中相对稳定,这与其他生态系统土壤 C/N 相对稳定的结果一致[30],也符合化学计量学的基本原则[31]。但由于 35 a 和 45 a 生林分深层有机碳的含量较多,60 cm 以下土层中 C/N 显著增大的趋势,这也说明随着土层加深林地氮的有效性在降低[23]。土壤 C/P 和 N/P 均随着土层加深而降低,这由于全磷含量相对稳定,而有机碳和全氮表现随土层加深逐渐下降所导致。土壤 C/N 和 C/P 随着土层加深其变化规律相反的结果进一步说明随着土层加深樟子松林土壤受氮的限制更为显著。

4　结 论

科尔沁沙地樟子松林土壤中有机碳、全氮、全磷含量极为贫瘠,但人工林种植增加了土壤碳、氮、磷养分含量;各林龄樟子松林土壤同时受氮、磷养分的限制,但随土层加深受氮的限制更为显著。为了提高该区樟子松林的生产力,在人工林抚育管理中适当增加氮 、磷肥的同时,林内引入豆科固氮植物来提高土壤肥力。尤其是 45 a 生樟子松林土壤肥力呈现下降趋势,限制了当地樟子松林的可持续发展。为此,建议要采取禁牧(封育)的经营措施,防止凋落物的大量损失而加剧养分的亏缺;另一方面,对衰退樟子松及时进行更新,同时要营造混交林,以维护生态系统的稳定性和持续性。

参考文献(References):

〔1〕　Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, et al. Organism size, life history, and N: P stoichiometry〔J〕. BioScience, 1996, 46(9):

674 – 684.

〔2〕 Wang W Q, Tong C, Jia R X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water – flooded frequency〔J〕. Journal of Soil & Water Conservation, 2010, 24(3): 238 – 242.

〔3〕 刘万德,苏建荣,李帅锋,等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C,N,P 化学计量特征〔J〕. 生态学报,2010,30(23):6 581 – 6 590.〔Liu Wande, Su Jianrong, Li Shuaifeng, et al. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad – leaved forest in Pu´er, Yunnan Province〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6 581 – 6 590.〕

〔4〕 罗亚勇,张宇,张静辉,等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征〔J〕. 生态学杂志,2012,31(2):254 – 260.〔Luo Yayong, Zhang Yu, Zhang Jinghui, et al. Soil stoichiometry characteristics of alpine meadow at its different degradation stages〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 254 – 260.〕

〔5〕 曹娟,闫文德,项文化等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征〔J〕. 林业科学,2015,51(7):1 – 8.〔Cao Juan, Yan Wende, Xiang Wenhua, et al. Stoichiometry characterization of soil C, N and P of chinese fir plantations at three different ages in huitong, Hunan Province, China〔J〕. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 1 – 8.〕

〔6〕 刘兴诏,周国逸,张德强,等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N,P 的化学计量特征〔J〕. 植物生态学报,2010,34(1):64 – 71.〔Liu Xingzhao, Zhou Guoyi, Zhang Deqiang, et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 64 – 71.〕

〔7〕 刘珮,马慧,智颖飙,等. 9 种典型荒漠植物生态化学计量学特征分析〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):207 – 216.〔Liu Pei, Ma Hui, Zhi Yingbiao, et al. Ecological stoichiometric differences of nine typical eremophyte species〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 207 – 216.〕

〔8〕 Yang Y H, Luo Y Q. Carbon: Nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development〔J〕. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(2): 354 – 361.〕

〔9〕 朱教君,康宏樟,许美玲. 科尔沁沙地南缘樟子松(*Pinus sytvestris* var. *mongolica*)人工林天然更新障碍〔J〕. 生态学报,2007,27(10):4 086 – 4 095.〔Zhu Jiaojun, Kang Hongzhang, Xu Meiling. Natural regeneration barriers of Pinus sytvestris var. *mongolica* plantations in southern Keerqin sandy land, China〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4 086 – 4 095.〕

〔10〕 曾德慧,姜凤岐,范志平,等. 沙地樟子松人工林稳定性的研究〔J〕. 应用生态学报,1996,7(4):337 – 343.〔Zeng Dehui, Jiang Fengqi, Fan Zhiping, et al. Stability of Mongolian pine plantations on sandy land〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(4): 337 – 343.〕

〔11〕 韩美娜,魏亚伟,秦胜金,等. 沙地樟子松人工林碳裤动态及其分配特征〔J〕. 生态学杂志,2015,34(7):1 798 – 1 803.〔Han Meina, Wei Yawei, Qin Shengjin, et al. Carbon storage dynamics and its distribution pattern in Pinus sylvestris var. mongolica plantation in sandy land〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1 798 – 1 803.〕

〔12〕 雷泽勇,周晏平,赵国军,等. 竞争对辽宁西北部樟子松人工固沙林树高生长的影响〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):144 – 149.〔Lei Zeyong, Zhou Yanping, Zhao Guojun, et al. Effects of competition on tree height growth of sand – fixation plantations of Pinus sylvestris var. mongolica in northwest Liaoning province〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 144 – 149.〕

〔13〕 吴祥云,刘广,韩辉. 不同类型樟子松人工固沙林土壤质量的研究〔J〕. 防护林科技,2001,49(4):15 – 17.〔Wu Xiangyun, Liu Guang, Han Hui. Soil quality in different types of sand – fixation plantations of Pinus sylvestris var. mongolica〔J〕. Protection Forest Science and Technology, 2001, 49(4): 15 – 17.〕

〔14〕 鲍士旦. 土壤农化分析〔M〕(第三版). 北京:中国农业出版社,2000.〔Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis〔M〕3nd ed. Bei Jing: China Agricultural Press, 2000.〕

〔15〕 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C,N,P 化学计量特征影响〔J〕. 生态学报,2014,34(9):2 246 – 2 255.〔Hu Qiwu, Nie Lanqin, Zheng Yanming, et al. Desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in Pinus elliottii plantation〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2 246 – 2 255.〕

〔16〕 白雪娟,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同人工林叶片 – 凋落叶 – 土壤生态化学计量特征〔J〕. 应用生态学报,2016,27(12):3 823 – 3 830.〔Bai Xuejua, Zeng Quanchao, An Shaoshan, et al. Ecological stoichiometry characteristics of leaf – litter – soil in different plantations on the Loess Plateau, China〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3 823 – 3 830.〕

〔17〕 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等. 河口湿地植物活体 – 枯落物 – 土壤的碳氮磷生态化学计量特征〔J〕. 生态学报,2011,31(23):7 119 – 7 124.〔Wang Weiqi, Xu Linglin, Zeng Congsheng, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant – litter – soil systems in estuarine wetland〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 31(23): 7 119 – 7 124.〕

〔18〕 王凯,宋立宁,张成龙,等. 科尔沁沙地典型林分土壤有机碳储量与根际效应的关系〔J〕. 水土保持学报,2013,27(6):221 – 225.〔Wang Kai, Song Lining, Zhang Chenglong, et al. Relationship between soil organic carbon storage and rhizosphere effect of typical forests in horqin sandy land〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation. 2013, 27(6): 221 – 225.〕

〔19〕 Luyssaert S, Schulze E D, B · rner A, et al. Old growth forests as global carbon sinks〔J〕. Nature, 2008, 455(7 210): 213 – 215.

〔20〕 史军辉,王新英,刘茂秀,等. 不同林龄胡杨林叶片与土壤的化学计量特征〔J〕. 干旱区研究,2017,34(4):815 – 822.〔Shi Junhui, Wang Xinying, Liu Maoxiu, et al. Stoichiometric characteristics of leaves of populus euphratica with different stand ages and soil〔J〕. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 815 – 822.

〔21〕 谷杨. 章古台樟子松固沙林衰退成因及有效防治措施研究〔D〕. 阜新:辽宁工程技术大学,2009.〔Gu Yang. The Facts that Led the Degradation of Artificial Sand – fixation Pinus svlcestris var. mongolica and Its Prevention Measures〔D〕. Fu Xin: Liao Ning Technical University, 2009.〕

〔22〕 牛沙沙,周永斌,刘丽颖,等. 不同林龄樟子松人工林土壤理化性质〔J〕. 东北林业大学学报,2015,43(2):47 – 50.〔Niu Shasha, Zhou Yongbin, Liu Liying, et al. Soil properties in Pinus sylvestris var. mongolica plantation of different ages〔J〕. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(2): 47 – 50.〕

〔23〕 赵琼,曾德慧,陈伏生,等. 沙地樟子松人工林土壤磷库及其有

效性初步研究〔J〕. 生态学杂志,2004,23(5):224 - 227.〔Zhao Qiong,Zeng Dehui,Chen Fusheng,et al. Soil phosphorus pools and availability on Pinus sylvestris var. mongolica plantation〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2004,23(5):224 - 227.〕

〔24〕王维奇,曾从盛,钟春棋,等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响〔J〕. 环境科学,2012,31(10):2 411 - 2 416.〔Wang Weiqi,Zeng Congsheng,Zhongchunqi,et al. Effect of human disturbance on ecological stoichiometry characteristics of soil carbon,nitrogen and phosphorus in minjiang river estuarine wetland〔J〕. Environmental Science,2012,31(10):2 411 - 2 416.〕

〔25〕曾凡鹏,迟光宇,陈欣,等. 辽东山区不同林龄落叶松人工林土壤 - 根系 C:N:P 生态化学计量特征〔J〕. 生态学杂志,2016,35(7):1 819 - 1 825〔Zeng Fanpeng,Chi Guangyu,Chen Xin,et al. The stoichiometric characteristics of C,N and P in soil and root of larch (Larix spp.) plantation at different stand ages in mountainous region of eastern Liaoning Province,China〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2016,35(7):1 819 - 1 825.〕

〔26〕郭冬艳. 退化草地的生态化学计量学研究—以吉林西部退化草地为例〔D〕. 吉林:吉林大学,2013.〔Guo Dongyan. Research on ecological stoichiometry of degraded grassland:A case study of meadow in western jilin province〔D〕. Ji Lin:Ji Lin University,2013.〕

〔27〕梁启鹏,余新晓,庞卓,等. 不同林分土壤有机碳密度研究〔J〕. 生态环境学报,2010,19(4):889 - 893.〔Liang Qipeng,Yu Xinxiao,Pang Zhuo,et al. Study on soil organic carbon density of different forest types〔J〕. Ecology and Environmental Sciences,2006,21(6):54 - 57.〕

〔28〕刘楠,王玉杰,王毅力,等. 重庆缙云山典型林分土壤有机碳密度特征〔J〕. 生态环境学报,2009,18(4):1 492 - 1 496.〔Liu Nan,Wang Yujie,Wang Yili,et al. Soil organic carbon density of 4 forest types in Jinyun mountain of Chongqing〔J〕. Ecology and Environmental Sciences,2009,18(4):1 492 - 1 496.〕

〔29〕白荣. 滇中高原典型植被演替进程中的生态化学计量比特征研究〔D〕. 昆明:昆明理工大学,2012.〔Bai Rong. The central of yunnan plateau ecological stoichiometry characteristics of the typical vegetation succession process〔D〕. Kun Ming:Kun Ming University,2012.〕

〔30〕Cleveland C C,Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil:Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass〔J〕. Biogeochemistry,2007,85(3):235 - 252.

〔31〕Achat D L,Bakker M R,Augusto L,et al. Phosphorus status of soils from contrasting forested ecosystems in southwestern Siberia:effects of microbiological and physicochemical properties〔J〕. Biogeosciences,2013,10(2):733 - 752.

Soil Ecological Stoichiometry of Pinus sylvestris var. Mongolica Planted Forests with Different Ages in Horqin Sandy Land

SHU Min1,JIANG Tao2,WANG Dong - li1,LIAN Zhao1,TANG Jia - xi1,
KONG Tao1,XU Yi - yuan1 ,HAN Xiao - mei1

(1 *College of Environmental Sciences and Engineering*,*Liaoning Technical University*,*Fuxin* 123000;
2 *Liaoning institute of sandyland improvement and utilization*,*Fuxin* 123000)

Abstract: Soil organic carbon (C),total nitrogen (N) and total phosphorus (P) from 10 cm to 100 cm of soil depth were measured in Pinus sylvestris var. Mongolica planted forests of 4 different ages(15 - ,25 - ,35 - and 45 - year - old) in Horqin sandy land. In order to provide a theoretical basis for sustainable management of P. sylvestris planted forests,dynamic regulation of these elements changed with forests ages increased and soil depth increased were also investigated. The results showed that the contents of soil organic C,total N and total P were 2.51 ~ 8.27 g? kg^{-1},0.12 ~ 0.45 g? kg^{-1} and 0.14 ~ 0.21 g? kg^{-1} respectively,all of them below the national level on average in China. As forest age got older,contents of soil organic C,C/N and C/P increased; total N and total P increased first and then decreased (significantly decreased at 45 - year - old),and there was no significant change in N/P. As the soil depth increasing,both of organic C and total N decreased,the contents of them were lower than one third of the total amount in forest stands from 0 cm to 20 cm depth. While C/N increased and C/P decreased,which showed an opposite change. The vertical distribution of total P and N/P did not change significantly. Our findings indicated that,although the contents of soil organic C,total N,and total P were extremely poor in Horqin sandy land,but these planted forests increased soil C, N and P nutrients storage. Decline of soil fertility happened with forest age at 45 - year - old. The nitrogen and phosphorus were the limitation of soil nutrient in different planted forests of P. Mongolica, and the limit by nitrogen was more significant with soil depth increasing.

Key words: Pinus sylvestris var. mongolica planted forests age; soil; ecological stoichiometry; Horqin Sandy Land